

運動時および運動終了後の二酸化炭素排出動態と体力レベルの関係について

著者	柚木 孝敬
雑誌名	北海道浅井学園大学生涯学習システム学部研究紀要
巻	5
ページ	27-36
発行年	2005-03-23
URL	http://id.nii.ac.jp/1136/00000610/

運動時および運動終了後の二酸化炭素排出動態と体力レベルの関係について

Relationship between Kinetics of CO₂ Output During and After Exercise and Physical Fitness

柚 木 孝 敬

Takahiro YUNOKI

I. はじめに

最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\text{max}$) に関する研究¹⁾ は従来から精力的に進められてきており、その成果が、ヒトの健康や運動に関連する体力の評価に活用されている。酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$; ml/min) が多い、すなわち、単位時間当りに摂取される O₂ が多いということは、有酸素的代謝によって単位時間当りに供給されるエネルギーが多いことを意味する。したがって、 $\dot{V}O_2\text{max}$ が高いことは、単位時間当りに行うことのできる有酸素的な作業や運動の仕事量の最大値が大きいことを示唆する。そのため、体力レベルを評価するうえでの有用な指標として $\dot{V}O_2\text{max}$ が用いられていると考えられる。例えば、健康運動指導者用のテキスト²⁾ には、他人の介助を要せずに立ったり、座ったり、歩いたりできるためには、最低限12-13ml/kg/min 程度の $\dot{V}O_2\text{max}$ が必要であり、また、健康で活動的な生活を送るためには、20ml/kg/min 程度の $\dot{V}O_2\text{max}$ を保持していることが望ましいとある。しかしながら、日常の生活行動やスポーツの多くは、 $\dot{V}O_2$ が上限に達しない身体運動によってなされるのが普通であり、また、そのような運動にも関わらず、筋疲労感や呼吸困難感により、その運動を停止または運動強度を低下せざるを得なくなることが多々ある。

$\dot{V}O_2\text{max}$ が発現しないような最大以下の身体運動であっても、エネルギー消費が増すにつれて、CO₂や乳酸など酸性物質の産生量が増加する。乳酸から解離する水素イオン (H⁺) の一部は、重炭酸系で緩衝される (H⁺ + HCO₃⁻ → CO₂ + H₂O) ので、CO₂産生量は O₂消費量よりも多くなる。この過剰な CO₂ (過剰 CO₂) が肺換気によって体外に排出されなければ、CO₂が体内に貯蔵され、重炭酸系による H⁺の緩衝が抑制されることになる。これは、結果とし、筋や血液の pH の低下をもたらし、筋疲労や呼吸困難の原因となると考えられる。したがって、運動を長時間持続する場合や短時間の運動を繰り返し行う場合には、運動中や運動終了後に過剰 CO₂を速やかに体外へ排出すること (CO₂過剰排出) が重要になると考えられる。

先行研究^{3)~6)} によると、運動時および運動終了後の CO₂過剰排出は、生体の pH 恒常性を維持するために起きる一連の緩衝反応の最終段階であるとされる。それが正しければ、ある運動を短時間の休息を挟んで2回行ったとき、1回目の運動終了後の CO₂過剰排出が2回目の運動のパフォーマンスに影響を与えると予測される。このことを検討するために、本研究では、

運動負荷として、等尺性随意最大筋力（MVC）の50%に相当する筋力（50%MVC）での等尺性筋収縮運動を用いる。等尺性筋収縮運動を25, 50, 75%MVCで疲労困憊まで行くと、筋中乳酸濃度は50%MVCで最も高くなることが報告されている⁷⁾。また、この程度の強度で等尺性筋収縮運動を行うと、筋内圧の上昇に伴って血流が阻害される⁸⁾ため、運動時に筋内で産生されるCO₂や乳酸は運動を終了しないと筋外へ流出しないと考えられる。したがって、2回目の運動のパフォーマンスのためには、1回目の運動終了後のCO₂過剰排出が特に重要になると考えられる。

Ⅱ. 方 法

A. 被 験 者

健康な男性5名（年齢：19.6±1.1 歳，身長：171.6±6.3 cm，体重：63.0±10.1 kg（平均±標準偏差））を被験者とした（表1）。本研究においては、ヒトを対象とする医学研究の倫理的原則を示しているヘルシンキ宣言を参照し、各被験者に対して、研究の主旨，手順，実験に伴う危険性，および被験者としての実

験協力をいかなる時でも中止する権利

を有することを説明した。その後，全ての被験者から実験協力の承諾を書面にて確認し，本研究に関わる実験を開始した。各被験者は，漸増運動負荷テスト，等尺性随意最大筋力（MVC）テスト，50%MVCテスト①，50%MVCテスト②の順に4つの運動負荷テスト

表1. 被験者の身体特性

被 験 者	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	最大酸素摂取量 (ml/kg/min)	MVC (Nm)
A	21	175.0	55.4	41.7	282
B	18	161.1	51.5	58.6	206
C	20	177.2	76.9	44.1	448
D	19	171.0	63.0	54.6	193
E	20	173.5	68.3	45.8	252
平 均 値	19.6	171.6	63.0	49.0	276
標準偏差	1.1	6.3	10.1	7.2	102

を行った。各被験者は1日1種類のテストを受けた。また，50%MVCテスト①と50%MVCテスト②の間は約1週間の間隔を空けた。

B. 漸増運動負荷テスト

各被験者の $\dot{V}O_2\max$ を調べるために，電磁ブレーキ式自転車エルゴメータ（Aerobic Exercise Ergometer：日本光電）を用い，漸増運動負荷テストを実施した。このテストでは，各被験者は，サドル上での3分間の安静とそれに引き続く10watts負荷での3分間の脚ペダリング運動を行った後，連続して，30watts/minの漸増率で脚ペダリング運動を疲労困憊に至るまで行った。脚ペダリング運動の回転数は60回転/minとし，負荷漸増に伴ってそのペダル回転数を維持できなくなった時点を疲労困憊と判定した。漸増運動負荷テストでは，呼気ガス分析器（MMC 4400tc：Sensor Medics）を用い，換気量および呼気ガス諸変量をbreath-by-breathに連続測定し，15秒毎に平均出力した。吸気および呼気流量はタービン式ボリュウムトランスデューサ（測定範囲：6-220L/min）で計測した。このトランスデューサのキャリブレーション

ンは2Lのシリンジを用いて行った。 O_2 濃度および CO_2 濃度は、それぞれ、ジルコニア式酸素センサおよび赤外線センサを用いて計測した。これらセンサのキャリブレーションは各測定前に既知濃度の標準ガスにより行った。

C. 等尺性随意最大筋力 (MVC) テスト

多用途筋機能評価運動装置 (BIODEX SYSTEM 3: BIODEX MEDICAL SYSTEMS) を用いて膝伸展筋の等尺性随意最大筋力 (MVC) を測定した。被験者は専用の椅子に座り、片脚の膝関節角度を90度に固定された状態で、7秒間の膝伸展筋力発揮を2分間の休息を挟んで2回行った。その数分後、同様の方法で、もう片方の脚のMVCを測定した。両脚における計4回の測定で最高値を示した片脚のみについて、後日、再度MVCの測定を行い、前回より高値を示した場合はその値をMVCとした。

D. 50%MVC テスト①

各被験者は、MVCを示した片脚のみについて、MVCの50%強度を目標に等尺性膝伸展運動を疲労困憊まで持続させるテスト (50%MVC テスト①) を行った。50%MVC テスト①では、MVCテスト同様、BIODEX SYSTEM 3を用いて筋力を測定し、0.01秒毎に出力した。各被験者には、BIODEX SYSTEM 3のモニターに表示された目標ラインと実際に発揮している筋力値を示すラインとの誤差が最小になるように等尺性運動を持続させ、目標とされた力発揮レベルを維持できなくなった時点を経済困憊と判定し運動を終了させた。このテストでは、上述した呼気ガス分析器を用いて、運動前3分間の安静時、等尺性膝伸展運動時、運動終了後の換気量および呼気ガス諸変量を breath-by-breath に連続測定し、15秒毎に平均出力した。同時に、安静時、運動終了直後、運動終了後2, 5, 8分目に指先から25 μ lの血液を採取し、直ちに自動乳酸濃度分析器 (1500 Sport: YSI) で分析することにより、血中乳酸濃度 (La) を求めた。この分析器のキャリブレーションは各測定前に既知濃度の標準液を用いて行った。

E. 50%MVC テスト②

50%MVC テスト①と同じ等尺性膝伸展運動を2分の休息を挟んで2回行うテスト (50%MVC テスト②) を行った。各被験者には、1回目の運動は50%MVC テスト①と同じ時間だけ持続させ、2回目の運動は疲労困憊に至るまで持続させた。2回目の運動では、発揮筋力がMVCの45%強度以下に低下した時間が合計で3秒に達した時点を経済困憊とし、その時点までを持続時間とした。50%MVC テスト②では、換気量、呼気ガス諸変量、および血中乳酸濃度の測定は行わなかった。

F. CO_2 過剰排出の算出

先行研究^{3)~6)}に準じて、50%MVC テスト①における運動時および運動終了後の $\dot{V}CO_2$ と $\dot{V}O_2$ の差から単位時間当りの CO_2 過剰排出量 ($\dot{V}CO_2$ excess) を求めた。この $\dot{V}CO_2$ excessを運動開始時から $\dot{V}CO_2$ と $\dot{V}O_2$ の差がゼロになる時点まで加算した値を CO_2 過剰排出量 (CO_2 excess) とした。また、この CO_2 excessを、先行研究⁴⁾を参考にして、3つの相 (phase) に区分した。第1相を運動中の CO_2 excess (CO_2 excess (ph1))、第2相を運動終了時から

呼気終末 CO_2 分圧 (PETCO_2) が安静値に回復する時点までの CO_2 excess (CO_2 excess (ph2)), 第3相をそれ以降の CO_2 excess (CO_2 excess (ph3)) とした。

G. 統計処理

結果は平均値 \pm 標準偏差で示した。二変量間の平均値の有意差検定には、対応のある t 検定を用いた。二変量間の関連性はピアソンの相関係数によって検討した。また、多変量間の平均値の有意差検定には、一元配置分散分析を用い、その結果、有意差が確認された場合は、Tukey-Kramer の HSD 検定を用い、すべてのペアについて多重比較検定を行った。統計的有意水準は 5%未満とした。

Ⅲ. 結 果

漸増運動負荷テストで得られた $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ および等尺性随意最大筋力 (MVC) テストで得られた膝伸展筋の MVC を表 1 に示した。MVC と体重との間に相関関係はなかった。

表 2 に 50%MVC テスト①および 50%MVC テスト②で得られた平均発揮筋力および持続時間を示した。これらのテストでは、MVC の 50% の筋力 (138 ± 51 Nm) を維持することが目標であったが、テスト①、テスト②の 1 回目、およびテスト②の 2 回目で実際に発揮された平均筋力は、その目標値より約 2~4%

低かった。50%MVC テスト①の持続時間 (=50%MVC テスト②の 1 回目の持続時間) と 50%MVC テスト②の 2 回目の持続時間との間に相関関係は認められなかった。また、 $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ と 50%MVC テスト②の 2 回目の持続時間との間にも有意な関係は認められなかった。被験者 B は体調不良により 50%MVC テスト②を辞退した。

表 3 に 50%MVC テスト①で得られた La を示した。安静時から運動終了直後にかけて、 La は有意な変化を示さなかった。 La は、運動終了後 2 分時にピーク値を示し、その後 5 分目までは有意な変化を示さなかった。

図 1, 2, および 3 に、50%MVC テスト①で得られた各被験者の換気量 ($\dot{V}\text{E}$), PETCO_2 , および $\dot{V}\text{CO}_2$ ex-

表 2. 50%MVC テスト①および 5②で得られた平均発揮筋力および持続時間

被 験 者	テスト①		テスト②-1		テスト②-2	
	(Nm)	(sec)	(Nm)	(sec)	(Nm)	(sec)
A	130	60	126	60	130	25
B	99	93	-	-	-	-
C	202	59	214	59	211	35
D	89	72	82	72	90	21
E	126	113	126	113	133	58
平均 値	129	79	137	76	141	35
標準偏差	44	23	55	25	51	16

表 3. 50%MVC テスト①で得られた血中乳酸濃度

被 験 者	血中乳酸濃度 (mM)				
	安静時	運動終了後			
		0 分	2 分	5 分	8 分
A	1.39	1.97	2.88	2.84	-
B	0.87	0.94	2.73	2.39	-
C	0.73	0.72	2.85	2.78	2.40
D	0.66	1.07	2.03	2.04	1.56
E	0.73	1.18	3.97	3.50	2.96
平均 値	0.88	1.18	2.89*	2.71*	2.31
標準偏差	0.30	0.48	0.70	0.55	0.70

被験者 A と B においては、運動終了後 2 分目から 5 分目にかけて血中乳酸濃度が低下したため、8 分目の採血を行わなかった。

*安静時および 0 分の値と有意 ($P < 0.05$) に異なる。

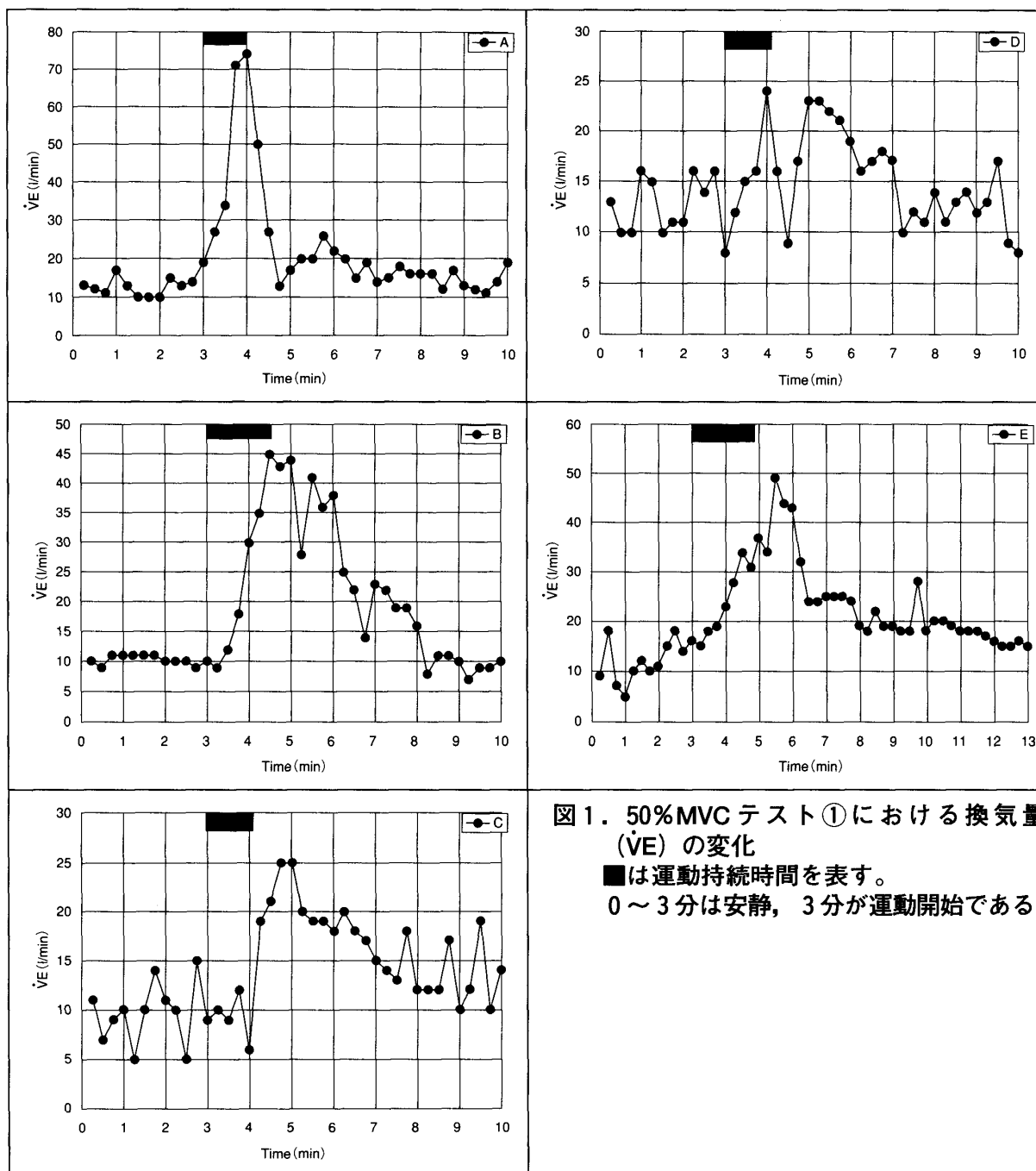


図1. 50%MVCテスト①における換気量(\dot{V}_E)の変化
 ■は運動持続時間を表す。
 0～3分は安静, 3分が運動開始である。

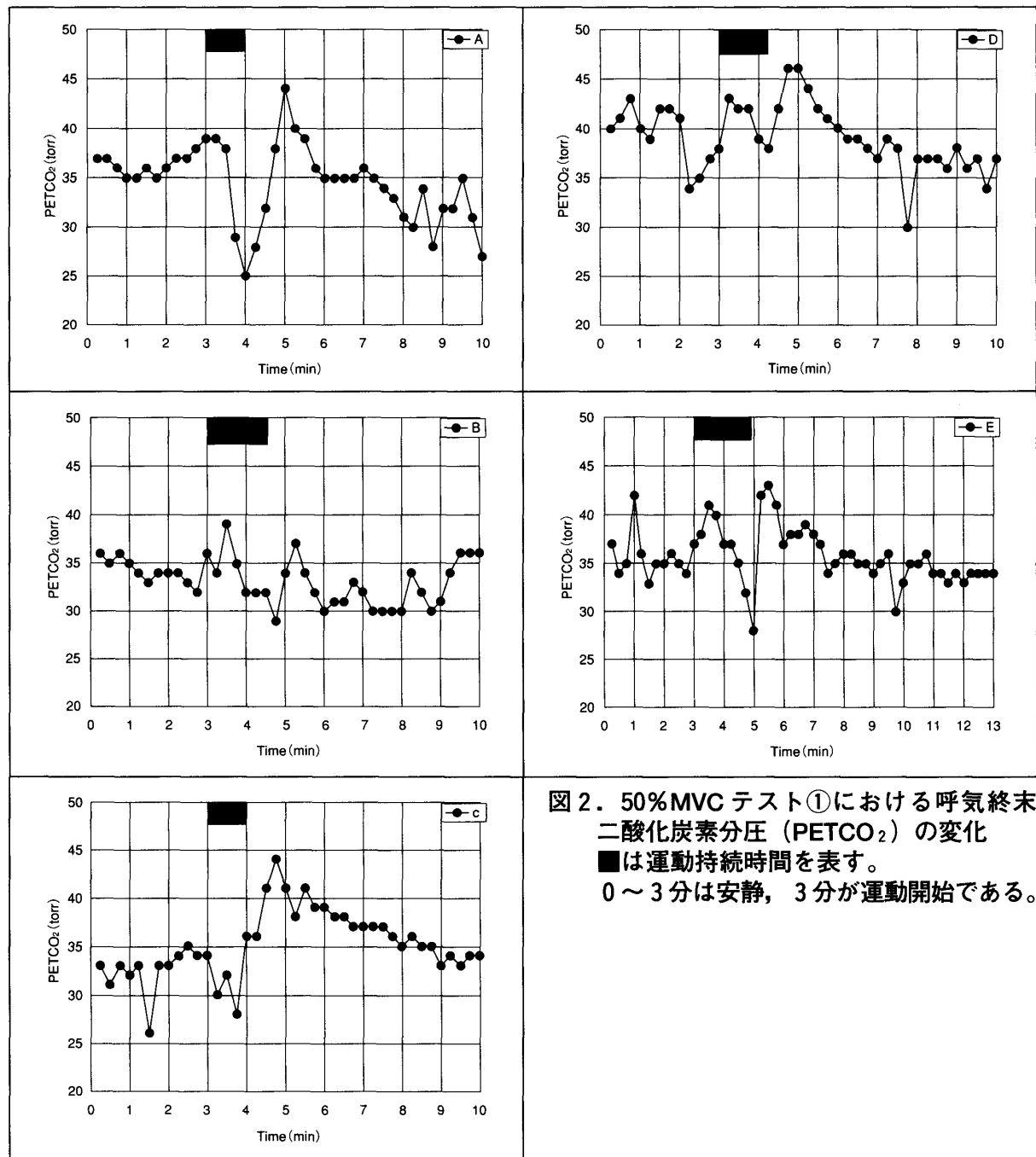


図2. 50%MVCテスト①における呼気終末二酸化炭素分圧 (PETCO₂) の変化
 ■は運動持続時間を表す。
 0～3分は安静, 3分が運動開始である。

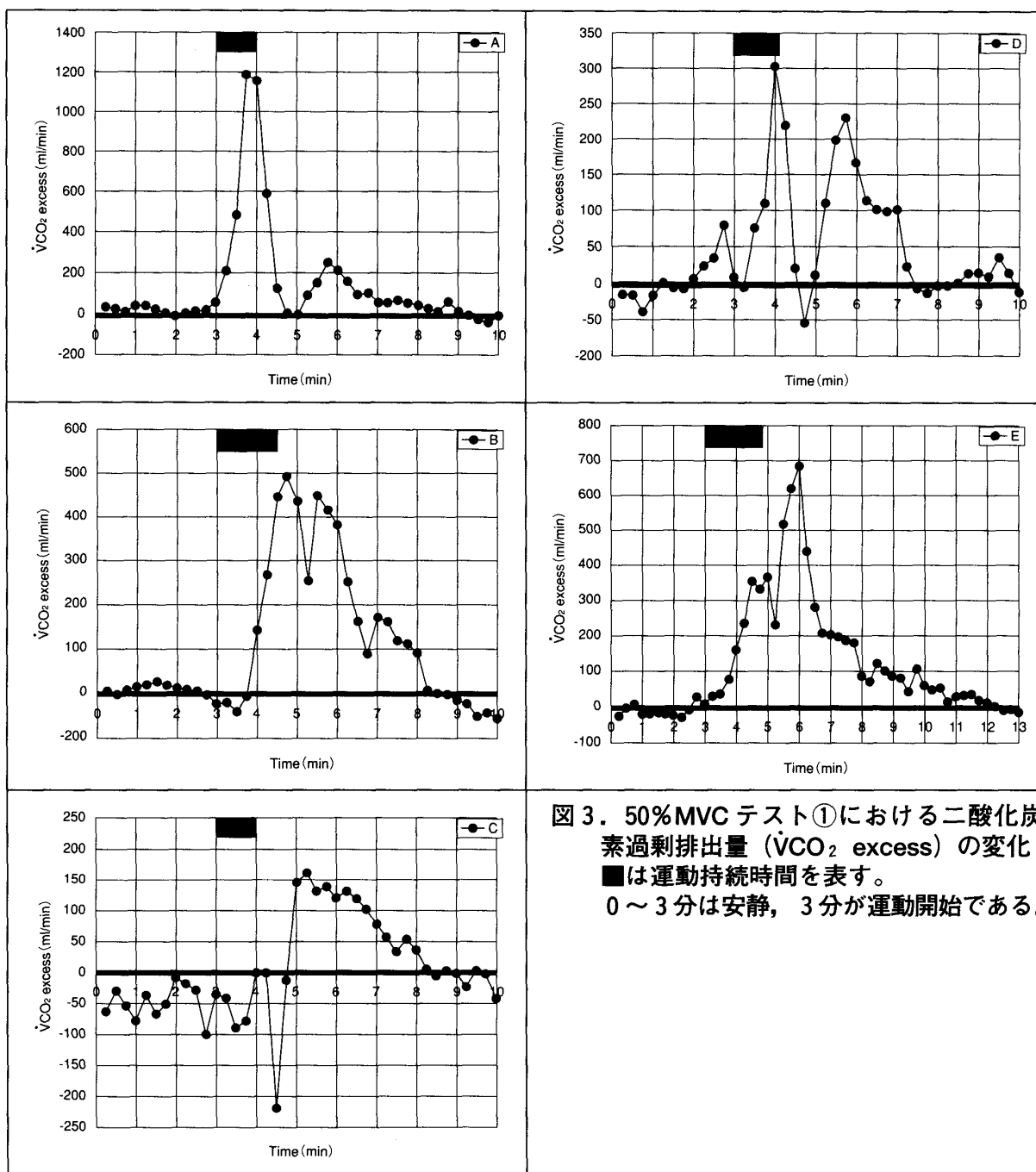


図3. 50%MVCテスト①における二酸化炭素過剰排出量 ($\dot{V}CO_2$ excess) の変化
 ■は運動持続時間を表す。
 0～3分は安静, 3分が運動開始である。

cessを示した。これら三変量の動態は、被験者Cを除く全被験者ではほぼ一致していた。すなわち、 $\dot{V}E$ は、運動中は上昇し、運動を終了すると下降するが、その後、再上昇するという動態を示した。 $PETCO_2$ の動態は、運

動を開始すると数十秒以内に下降する

が、運動を終了すると速やかに上昇し、その後再び下降に転じ運動開始前より

も低下するというものであった。 $\dot{V}CO_2$

excessは、運動中は上昇し、運動を終了すると下降するが、その後、再上

昇するという動態を示した。表4には、

この $\dot{V}CO_2$ excessを運動開始時から

$\dot{V}CO_2$ excessがゼロになる時点まで

加算して求められる CO_2 excess (表

中のphase (1 + 2 + 3) に相当) を

示した。この CO_2 excessを3つの相

に区分すると、 CO_2 excess (ph2) が

50%MVCテスト②の2回目の持続時間

と有意 ($r=0.965, p<0.05$) な相関

関係を示した (図4)。また、統計的

に有意ではなかったが、50%MVCテ

スト②の1回目と2回目の運動の間に

とられた2分の休息期の CO_2 excess

もテスト②の2回目の持続時間との間

に高い相関係数 ($r=0.819, p=0.18$) を示した。

表4. CO_2 excess (ml)

被 験 者	phase (1)	phase (2)	phase (3)	phase (2 + 3)	phase (1 + 2 + 3)
A	758	244	304	548	1306
B	222	271	603	874	1096
C	-53	272	-	272	220
D	165	182	125	307	472
E	357	890	341	1231	1588
平 均 値	290	372	343	646	936
標準偏差	300	292	197	406	574

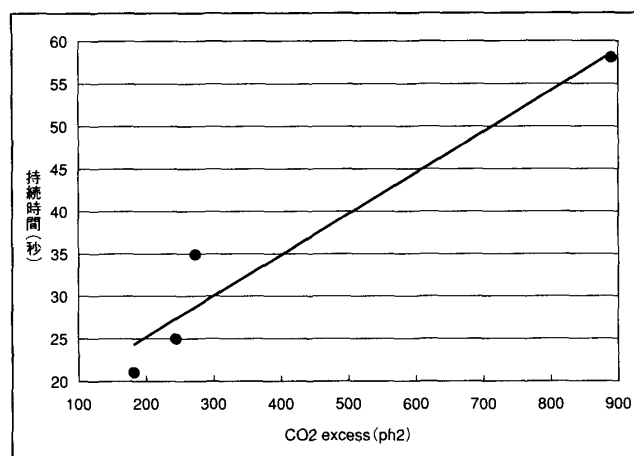


図4. CO_2 excess (ph2) と持続時間の関係

IV. 考 察

本研究とはほぼ同じ時間 (約80秒) の動的運動 (自転車ペダリング) を行くと、運動終了直後の La は5-8 mM程度になる^{3), 4)}。本研究では、安静時と等尺性運動終了直後の La に有意差は認められなかった。平均2.89mMという低い値であるが、運動終了後2分時に La のピーク値が観察された。したがって本研究では、乳酸は、運動中に筋内で増加していたが、筋内圧上昇に伴う阻血により、筋外の血液に流出できずに筋内に留まっていたと推測される。血中の CO_2 は測定してないが、乳酸同様、筋内で増加した CO_2 も血液に流出しなかったと考えられる。

このように、運動時は筋で生成された乳酸や CO_2 が血液に流出しなかったにも関わらず、

運動時に $\dot{V}CO_2$ excess の上昇が認められた。これは、 $\dot{V}E$ の増加によって説明できる。すなわち、被験者 C を除く全被験者で、運動中に $\dot{V}E$ の増加が観察され、 $PETCO_2$ の低下が起きていた。よって、血中では CO_2 が外界へ洗い出されていたと考えられる。このとき、乳酸や CO_2 の筋から血液への流出がなかったということは、末梢化学受容器に対する体液性の換気刺激がなかったことを意味する。したがって、このときの換気亢進は、等尺性運動に伴う筋の機械的圧力や痛み、あるいは、筋内 pH の低下が原因であったかもしれない。いずれにしても、運動中は、換気亢進により、筋からではなく、血液から CO_2 過剰排出が生じていたと考えられる。

動的運動の場合、 $\dot{V}CO_2$ excess は、運動開始後は一時的に下降するが、その後は上昇に転じ、運動終了後数十秒まで上昇し続ける^{3), 4)}。しかし、本研究においては、 $\dot{V}CO_2$ excess は、運動を終了すると下降し、その後、再上昇するという動態を示した。 $\dot{V}E$ もこれと同様の変化を示した。運動を終了すると同時に筋の機械的圧力や痛みは消失する。これは、運動筋からの求心性情報による換気亢進が停止することを意味する。一方、運動を終了しても、乳酸や CO_2 が筋から血液へ流出し、末梢化学受容器に体液性の刺激が伝わるまでには時間がかかるので、体液性刺激が原因となる換気亢進はすぐには起こらないと考えられる。よって、運動を終了すると、 $\dot{V}E$ が低下したと考えられる。この $\dot{V}E$ の低下により、筋から血液に移動した CO_2 あるいは乳酸が筋から血液に移動しそこで緩衝され増加した CO_2 は、肺から外界への排出が抑制され、生体内に貯蔵される方向にあったと推測される。そのために、この局面の $PETCO_2$ が上昇したと考えられる。その後は、 $\dot{V}E$ の再上昇と La の上昇のタイミングがほぼ一致していた。したがって、 $\dot{V}CO_2$ excess の再上昇は、体液性刺激による換気亢進が起きたこと、そして、筋から血液へ流出した乳酸が重炭酸系によって緩衝されたことが原因として考えられる。

このように、 $\dot{V}CO_2$ excess は、動的運動とは異なる 2 つのピークをもつ動態を示した。そこで、本研究では、この動態と先行研究⁴⁾を参考に、 CO_2 excess を 3 つの相 (phase) に区分した。その結果、 CO_2 excess (ph2) が 50%MVC テスト②の 2 回目の持続時間と有意な相関関係を示した。 CO_2 excess (ph2) の特徴は、呼吸性の CO_2 excess を含まない値である、運動終了後約 2 分間の値である、乳酸の重炭酸系による緩衝以外にクレアチンリン酸 (PCr) の再合成に影響される値であるといえる。したがって、乳酸の重炭酸系による緩衝と PCr の再合成が多いほど CO_2 excess (ph2) が多く、テスト②の 2 回目の持続時間も大きくなると考えられるが、 La の増加当りの CO_2 excess (ph2) とテスト②の 2 回目の持続時間との間には相関関係を示さなかったので、PCr の再合成の影響が大きいといえるだろう。本研究と同様の運動を 66%MVC の強度で行った先行研究⁹⁾では、40-55秒で疲労困憊に至り、その後 6 秒経過した時点の大腿四頭筋の PCr が安静時の 15%で、その後、2 分で安静時の 68%、4 分で 72%に回復すると報告されている。PCr の再合成に伴って放出される H^+ は急速に血液中に流出する¹⁰⁾ので、 CO_2 excess をもたらす。したがって、 CO_2 excess (ph2) が大きいものは、PCr の再合成速度が速かったのかもしれない。PCr の再合成は有酸素的に行なわれるので、その再

合成速度と $\dot{V}O_2\max$ との間に密接な関係があることが報告されているが、本研究ではテスト②の2回目の持続時間と $\dot{V}O_2\max$ の間に有意な関係は認められなかった。低い pH が PCr の回復を遅らせる可能性があるので、 CO_2 過剰排出によって筋からの CO_2 除去が促進されると、筋内における PCr の再合成が促進されるのかもしれない。そのため本研究では、 CO_2 excess (ph2) とテスト②の2回目の持続時間の間に有意な相関関係が認められたのであろう。

以上のように、等尺性運動を繰り返し行なうと、2回目の運動持続時間は、 $\dot{V}O_2\max$ ではなく、1回目の運動終了後の CO_2 過剰排出に影響されることが示唆された。

参考文献

- 1) 山地啓司：改定最大酸素摂取量の科学。杏林書院，東京，2001
- 2) 健康・体力づくり事業財団：健康運動実践指導者用テキスト。改訂第3版，2001
- 3) Yunoki T, Horiuchi M, Yano T : Kinetics of excess CO_2 output during after intensive exercise. Jpn. J. Physiol., 49 : 139-144, 1999
- 4) Yunoki T, Horiuchi M, Yano T : Excess CO_2 output response during and after short-term intensive exercise in sprinters and long-distance runners. Jpn. J. Physiol., 50 : 199-205, 2000
- 5) Yunoki T, Ogata H, Yano T : Relationship between blood lactate concentration and excessive CO_2 expiration during and after ramp exercise. Adv. Exerc. Sports Physiol., 9 : 97-103, 2003
- 6) 柚木孝敬，尾方寿好，平木場浩二，矢野徳郎：炭酸水素ナトリウムの摂取が短時間高強度運動時および終了後の CO_2 過剰排出に及ぼす影響。日本生理人類学会誌，9 : 59-65, 2004
- 7) Tesh P, and Karlsson J : Lactate in fast and slow twitch skeletal fibres of man during isometric contraction. Acta. Physiol. Scand., 99 : 230-236, 1977
- 8) 福永哲夫：筋の科学事典。朝倉書店，東京，2002
- 9) Harris RC, Edwards RHT, Hultman E, Nordesjo LO, Nyland B, and Sahin K: The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. Pflugers Arch., 367 : 137-142, 1976
- 10) Kemp GJ, Thompson CH, Taylor DJ, and Radda GK : Proton efflux in human skeletal muscle during recovery from exercise. Eur J Appl Physiol 76 : 462-471, 1997